



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 198 10 321 A 1**

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 02 N 2/06**  
G 05 B 13/02  
H 02 M 3/00

21 Aktenzeichen: 198 10 321.2  
22 Anmeldetag: 11. 3. 98  
43 Offenlegungstag: 16. 9. 99

DE 198 10 321 A 1

71 Anmelder:  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106  
Magdeburg, DE; Palis, Frank, Prof. Dr.-Ing.habil.  
Dr.h.c., 39114 Magdeburg, DE

72 Erfinder:  
Palis, Frank, Prof., 39114 Magdeburg, DE; Ladra,  
Uwe, Dipl.-Ing., 06110 Halle, DE

56 Entgegenhaltungen:

DE 42 37 509 A1

V. Utkin, "Variable structure systems with  
sliding modes", IEEE Trans. Automat. Contr.,  
Vol. 22, pp. 212-222, Apr. 1977;

Seung-Bok Choi, Chul-Hee Lee: "Force tracking  
control of a flexible gripper driven by  
\*\*\*piezoceramic\*\*\* actuators", in: Transactions  
of the ASME, Journal of Dynamic Systems,  
Measurement and Control (Sept. 1997) Vol. 119,  
No. 3, p. 439-46;

Choi, S.B., Par, Y.K., Cheong, C.C.: "Active  
vibration control of hybrid smart structures  
featuring \*\*\*piezoelectric\*\*\* films and electro-  
rheological fluids", in: Proceedings of the SPIE -  
The International Society for Optical Engineering  
(1996), vol. 2717, p. 544-52;

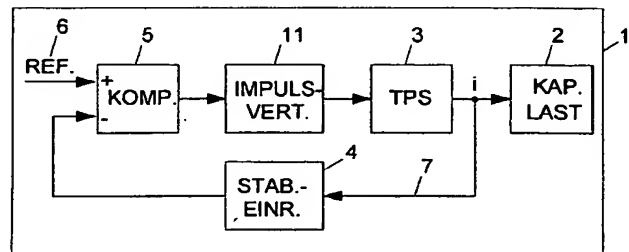
van Niekerk, J.L., Tongue, B.H.: "Active control  
of a circular membrane to reduce transient noise  
transmission", in: Trans. of the ASME, Journ. of  
Vibration and Acoustics (July 1995) Vol. 117,  
no. 3A, p. 252-8. 17 refs;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Schaltungsanordnung zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten und deren Verwendung

57 Es wird ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur Strom- und Ladungsregelung von Lasten (2) angegeben, mit einer Stromquelle, die einen konstanten Strom zur Verfügung stellt und mit durch eine Steuereinrichtung im Gleitbetrieb gesteuerten Transistorpulssteller (3). Die Pulsung des Stromes erfolgt nach dem Prinzip des schaltenden Verstärkers. Dazu vergleicht eine Stabilisierungseinrichtung (4) oder ein Stabilisierungsalgorithmus zwei Rückmeldesignale einer derartigen Schaltungsanordnung oder ein Rückmeldesignal (7) und dessen integriertes Signal mit einem externen Sollwert oder Referenzsignal (6) und betätigt im Gleitbetrieb die Schaltelemente des Transistorpulsstellers (3) in Abhängigkeit der Differenz der beiden Signale zum Referenzsignal. Je nach Zustand der Schaltelemente ändert sich die Stromrichtung an der kapazitiven Last (2), so daß diese entweder aufgeladen oder entladen wird. Beim Entladen der kapazitiven Last (2) wird die Energie in einer Induktivität zwischengespeichert und steht beim Aufladeprozess wieder zur Verfügung.  
Mit einem derartigen Verfahren und einer solchen Schaltungsanordnung kann das Auf- und Entladen einer kapazitiven Last (2) effektiv geregelt werden und zur hochdynamischen und hochpräzisen Lageregelung von Piezoaktoren und zur aktiven Schwingungsdämpfung an Maschinen und Geräten mit Piezoaktoren im Bereich einiger Kilohertz genutzt werden.



DE 198 10 321 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten wie z. B. Piezoaktoren, insbesondere im kHz-Bereich, mittels einer technischen Stromquelle und eines Transistorpulsstellers, der die kapazitive Last ansteuert. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Schaltungsanordnung zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten wie z. B. Piezoaktoren, insbesondere im kHz-Bereich, bestehend aus einer Induktivität zum Konstanthalten des Stromes und einem Transistorpulssteller, der die kapazitive Last ansteuert. Die Erfindung ist bevorzugt einsetzbar, um eine Strom- und Ladungsregelung von Piezoaktoren im kHz-Bereich zu realisieren. Sie kann bevorzugt zur hochdynamischen und hochpräzisen Positionierung von Piezoaktoren und/oder zur aktiven Schwingungsdämpfung an Maschinen und Geräten mit Piezoaktoren im Bereich einiger Kilohertz verwendet werden. Die Eigenschaften von leistungselektronischen Stellgliedern für kapazitive Lasten, wie z. B. Piezoaktoren, bestimmen wesentlich das Betriebsverhalten des Gesamtsystems. Bei der Wahl des Stellgliedes sind folgende wesentliche Forderungen zu beachten:

- Strom- und Spannungsbegrenzung des speisenden Leistungsverstärkers,
- hoher Durchlaßbereich (bis in den kHz-Bereich),
- Belastung durch ohmsche-kapazitive Last,
- Notwendigkeit der Stromumkehr,
- Energierückgewinnung.

Beim Entwurf des elektrischen Stellgliedes zur Speisung von hochdynamischen Piezoaktoren ist insbesondere die Forderung zu beachten, in minimaler Zeit einen dosierten Ladungsmengeneintrag in den Piezoaktor zu realisieren.

Diese Aufgabe kann mit verschiedenen Schaltungskonzeptionen gelöst werden. Die Einordnung bekannter schaltungstechnischer Lösungen von Stromquellen unter besonderer Berücksichtigung der Speisung kapazitiver Lasten kann nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen:

- Schaltungen auf der Grundlage kontinuierlicher Spannungsquellen
- Schaltungen mit Pulsbreitenmodulation (PWM)
- Schaltungen zur Energierückgewinnung
- Ansteuerungsmethoden.

In vielen Fällen liegt Schaltungen auf der Grundlage kontinuierlicher Spannungsquellen direkt oder indirekt das Stromquellenmodell zugrunde. Die technische Realisierung der Stromquelle erfolgt über eine kontinuierliche Spannungsquelle. Prinziplösungen, die sich hier einordnen lassen sind z. B. in DE 35 22 994 beschrieben.

PWM gesteuerte Stromrichter zur Speisung induktiver Lasten sind in der Praxis weit verbreitet. Stromquellengesteuerte elektrische Antriebe (CSI-Antriebe) sind hierfür typische Anwendungsfälle. Der Stromquellencharakter des Stellgliedes wird hierbei durch hinreichend große Induktivitäten im Laststromkreis und/oder durch unterlagerte Stromregelkreise erreicht. Derartige Lösungen sind z. B. in der DE 195 29 662 beschrieben.

Zur Realisierung eines 4-Quadranten Betriebes von Piezoaktoren muß ein Energiefluß in beiden Richtungen schaltungstechnisch gewährleistet sein. Es sind Schaltungen zur Energierückgewinnung bekannt, bei denen die Energie beim Entladen des kapazitiven Piezoaktors zwischengespeichert wird, um danach der Energiequelle oder dem Piezoaktor wieder zugeführt zu werden. Lösungen nach diesem Prinzip werden z. B. in der DE 42 37 509 behandelt. Der Strom-

quellenaspekt wird hierbei aber nicht explizit betrachtet.

Eine Reihe von Veröffentlichungen beinhaltet Ansteuerungsverfahren und Schaltungsvarianten zur technischen Realisierung der Ansteuerung von Leistungsverstärkern in Pulsbreitenmodulation. Hier läßt sich z. B. die EP 0701748 einordnen.

Kommerziell angebotene Stellglieder erfüllen bei weitem nicht die geforderten dynamischen Anforderungen. Speziell für Piezoaktoren ausgelegte Stellglieder werden den Anforderungen zwar weitgehend gerecht, bleiben jedoch prinzipiell unter den theoretisch und praktisch erreichbaren Parametern. Der Grund liegt in der Anwendung des Spannungsquellenprinzips.

Eigene Untersuchungen belegen, daß der stromgesteuerte Piezoaktor sich auszeichnet durch:

- weitgehende Linearität zwischen der Stellgröße Ladung und seiner Dehnung
- maximale Ausnutzung der Energiereserve des Stellgliedes durch Pulsbreitenmodulation des Stromes und
- einfache Regelstruktur des Gesamtsystems durch Anwendung des Prinzips der veränderlichen Struktur (sliding mode).

Das Prinzip der pulsbreitenmodulierten Stromquelle ist nicht neu und wird in der Elektroantriebstechnik beispielsweise in stromwechselrichter gespeisten Drehstromantrieben angewendet. Obwohl die meisten Schaltungen von ladungsgesteuerten Stellgliedern für Piezoaktoren dieser Konzeption recht nahe kommen, ist jedoch insgesamt festzustellen, daß sie die sich daraus ergebenden dynamischen Vorteile nicht konsequent für die regelungstechnische Optimierung des Gesamtsystems ausnutzen.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur Strom- und Ladungsregelung zu entwickeln, die hohen dynamischen Anforderungen gerecht werden und es insbesondere ermöglichen, die dynamischen Leistungsfähigkeit von Piezoaktoren voll auszunutzen. Die zu schaffende Lösung soll insbesondere für die Lageregelung von Piezoaktoren sowie für den Einsatz von Piezoaktoren zur Schwingungsdämpfung im Bereich bis zu einigen kHz geeignet sein.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 sowie des Anspruchs 3 gelöst.

Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Lösung ergeben sich aus den zugehörigen Unteransprüchen.

Eigene Untersuchungen bestätigen, daß mit der erfindungsgemäßen Lösung unter Verwendung der Technik des Gleitbetriebes Frequenzen bis weit über die mechanische Resonanzfrequenz des Aktorsystems praktisch beherrscht werden können. Als Lageregler wurde dabei ein P-Regler eingesetzt. Die Auswahl des Verstärkungsfaktors ist hierbei unkritisch und steht in direktem Zusammenhang mit der Dimensionierung des Stabilisierungsgliedes entweder als Einrichtung oder als Algorithmus. Entscheidend ist, daß zu jedem Zeitpunkt für das Stabilisierungsglied die Bedingungen des Gleitbetriebes eingehalten werden, d. h. daß die Energiereserve (Strom) des Stellgliedes groß genug sein muß, um den Piezoaktor soweit zu beschleunigen, daß das System in den Gleitbetrieb überführt wird.

Damit kann der Piezoaktor als idealer Folgeantrieb aufgefaßt werden, der seine Eingangsgröße nahezu fehlerfrei reproduziert. Dieses Verhalten ist bei der späteren Einbindung des Piezoaktors in eine Gesamtstruktur z. B. zur Schwingungsdämpfung von wesentlicher Bedeutung.

Im folgenden sind die wesentlichen Merkmale der Erfin-

dung anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen mit weiteren Einzelheiten näher erläutert.

Dabei zeigen

Fig. 1 eine schematische Darstellung der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung,

Fig. 2 eine schematische Darstellung des Ablaufs des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 3 eine schematische Darstellung der Stabilisierungseinrichtung,

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Verstärkerschaltung unter Verwendung der Erfindung,

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer Schaltung zur Lageregelung eines Piezoaktors unter Verwendung der Erfindung.

In der Schaltungsanordnung zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten im Gleitbetrieb, dargestellt in Fig. 1, wird ein Referenzsignal der Ladung (6) vorgegeben, daß mit einem Ausgangssignal der Stabilisierungseinrichtung (4) in einem Komparator (5) verglichen wird. Entsprechend der Differenz dieser beiden Größen wird ein Signal auf den Impulsverteiler (11) gegeben, der den Transistorpulssteller (3) im Gleitbetrieb ansteuert. Entsprechend der Ansteuerung der Schaltelemente des Transistorpulsstellers (3) ändert sich die Stromrichtung, so daß die kapazitive Last (2) entweder aufgeladen oder entladen wird. Als Eingangsgröße für die Stabilisierungseinrichtung (4) werden Strom und Ladung gemessen. Steht nur der Strom (7) als Meßsignal zur Verfügung, wird dieser in der Stabilisierungseinrichtung (4) integriert, damit auch das Signal der Ladung vorliegt. Beide Signale werden in der Stabilisierungseinrichtung (4) zu einem Ausgangssignal verarbeitet.

Beim Verfahren zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten im Gleitbetrieb, dargestellt in Fig. 2, wird ein Referenzsignal der Ladung (6) vorgegeben, daß mit einem Signal des Stabilisierungsalgorithmus (8) verglichen wird. Die Differenz dieser beiden Größen wird auf einen Schaltalgorithmus (9) gegeben, der den Transistorpulssteller (3) im Gleitbetrieb ansteuert. Entsprechend der Ansteuerung der Schaltelemente des Transistorpulsstellers (3) ändert sich die Stromrichtung, so daß die kapazitive Last (2) entweder aufgeladen oder entladen wird. Als Eingangsgröße für den Stabilisierungsalgorithmus (8) werden Strom und Ladung gemessen. Steht nur der Strom (7) als Meßsignal zur Verfügung, wird dieser im Stabilisierungsalgorithmus (8) integriert, damit auch das Signal der Ladung vorliegt. Beide Signale werden hier verarbeitet. Die geschilderten Algorithmen sind rechenstechnisch in einer Steuereinrichtung (10) realisiert. Die Eingangsgrößen der Steuereinrichtung (10) sind das Referenzsignal der Ladung (6) und die/das Meßsignale/Meßsignal, während die Ausgangsgröße die Schaltelemente des Transistorpulsstellers (3) ansteuert.

Fig. 4 zeigt das Schaltbild der Verstärkerschaltung. Über den Transistor  $T_0$  (20) wird die Zwischenkreisinduktivität  $L_0$  (21) durch Kurzschluß eines der beiden oder beider Transistorzweige  $T_1$ - $T_2$  (22, 23) oder/und  $T_3$ - $T_4$  (24, 25) auf einen konstanten Strom "aufgeladen". Danach wird dieser Strom durch Schließen der Diagonalzweige  $T_1$ - $T_4$  (22, 25) oder  $T_3$ - $T_4$  (23, 24) in der gewünschten Richtung auf den Piezoaktor gegeben. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Stromquellenbetrachtung ist, daß sich während der Taktzeit der Strom in der Induktivität (21) nicht oder nicht wesentlich ändert. Das setzt eine im Vergleich zur Kapazität des Aktors (2) große Induktivität  $L_0$  (21) und kleine Taktzeiten voraus.

Untersuchungen wurden mit  $L_0 = 50$  mH und  $f = 500$  kHz durchgeführt. Im Normalbetrieb ist  $T_0$  (20) geöffnet, so daß der Aktor (2) beim Aufladen seine Energie aus der Indukti-

vität bezieht und beim Entladen über  $D_0$  (26) wieder an die Induktivität (21) abgibt. Verluste werden durch zwischenzeitliches Taktten des Zwischenkreistransistors  $T_0$  (20) kompensiert. Es ist offensichtlich, daß mit der gewählten Schaltung der Piezoaktor auch umgeladen werden könnte. Gegen diese Betriebsart muß der Aktor durch steuerungstechnische Maßnahmen geschützt werden. Das läßt sich leicht durch ein entsprechendes Pulsmuster realisieren. Da die Spannung über dem Aktor erst über den eingepprägten Strom aufgebaut wird, kann sie sehr leicht kontrolliert und auf positive Werte beschränkt werden (unipolarer Betrieb). Die Zwischenkreisinduktivität übernimmt in diesem Fall auch eine Schutzfunktion gegen das Zuschalten einer möglichen negativen Zwischenkreisspannung beim "Aufladen" der Induktivität. Zusätzlich kann der Aktor noch durch eine entsprechende Schutzbeschaltung geschützt werden.

In der Stabilisierungseinrichtung (4) oder im -algorithmus (8) werden die gemessenen Signale des Stromes und der Ladung verarbeitet. Steht nur das Meßsignal des Stromes (7) zur Verfügung wird dieses integriert (13), um so die Ladung zu erhalten. Diese Signale werden dann jeweils mit einem PT-1 Glied oder mit PT-1 Verhalten (14, 15) verzögert. Die Parameter der PT-1 Glieder / PT-1 Funktionen müssen so dimensioniert sein, daß sie die Bedingungen zur Entstehung des Gleitbetriebes erfüllen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß das Übertragungsverhalten des Zweipunktgliedes (9) im Gleitbetrieb gegen unendlich geht. Bei der Wahl des Verhältnisses der Verstärkungsfaktoren der beiden PT-1 Glieder / PT-1 Funktionen gleich ihrer Zeitkonstante kann erreicht werden, daß der zeitliche Verlauf der Ladung entsprechend einem Referenzsignal (6) optimal ist. Durch Variieren dieses Verhältnisses können andere gewünschte, zeitliche Verläufe der Ladung realisiert werden. Die mit der Stabilisierungseinrichtung / dem Stabilisierungsalgorithmus verzögerten Signale des Stromes und der Ladung werden addiert, um mit dem Referenzsignal der Ladung (6) verglichen zu werden. Diese Struktur, die in Fig. 3 abgebildet ist, stellt eine Ladungsregelung dar, wobei der Regler ein Zweipunktglied (9) ist und in der Rückführung die Größen Strom und Ladung durch eine Stabilisierungseinrichtung / mit einem Stabilisierungsalgorithmus verzögert werden.

Fig. 5 zeigt das Schaltbild des lagegeregelten Piezoaktors im Gleitbetrieb. Das Zuschalten der einzelnen Diagonalzweige des Leistungsverstärkers (12) wird durch ein Zweipunktglied (9) mit den entsprechenden Ausgangswerten  $\pm i_{\max}$  berücksichtigt.

Aus den Untersuchungen, die unter Verwendung der Erfindung durchgeführt wurden, lassen sich folgende wesentlichen Schlußfolgerungen ziehen:

- Durch Einsatz des Gleitbetriebes kann ein Systemverhalten erreicht werden, bei dem das Übertragungsverhalten des Stellgliedes zwischen der Ausgangsgröße des Lagereglers und der elektrischen Ladung als verzögerungsfrei betrachtet werden kann. Durch zweckmäßige Auswahl der Regelparameter kann sogar ein leichtes Vorhaltverhalten erzielt werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß eine hinreichend große Energiereserve zur Abarbeitung des Sollsignales vorhanden ist, um den Gleitbetrieb zu garantieren.
- Durch die Kompensation der Trägheit der elektrischen Ladung und der Ausschaltung des Einflusses der Hysterese kann im Lagereglers mit größeren Verstärkungen bzw. mit einem zusätzlichen I-Anteil zur Verbesserung des Folgeverhaltens gearbeitet werden.
- Werden für den Entwurf des Lagereglers lineare Methoden angewendet und wird aus praktischen Gründen auf differenzierende Anteile verzichtet, sind die reali-

sierbaren Schnittfrequenzen auf (ca. 0,5 ... 0,7)  $\omega_{res}$  begrenzt.

- Aufgrund der notwendigen hohen Frequenzen im Gleitbetrieb wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt auf den Einsatz analoger Technik für die piezoaktornahe Informationstechnik orientiert.

mit Piezoaktoren im Bereich einiger Kilohertz.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten wie z. B. Piezoaktoren, insbesondere im kHz-Bereich, mittels einer technischen Stromquelle und eines Transistorpulsstellers, der die kapazitive Last (2) ansteuert, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Momentanwerte von Strom und Ladung der kapazitiven Last (2) bzw. vom Strom und seinem Integral erfaßt und mittels eines Stabilisierungsalgorithmus (8) verzögert werden, die Ausgangsgröße des Stabilisierungsalgorithmus (8) mit einem Referenzsignal der Ladung verglichen und die Differenz einem Schaltalgorithmus (9) zugeführt wird, der einen Transistorpulssteller (3) im Gleitbetrieb angesteuert, wobei die Dimensionierung des Stabilisierungsalgorithmus (8) nach den Bedingungen zur Entstehung des Gleitbetriebes erfolgt und die Stromquelle so dimensioniert ist, daß für das Auf- und Entladen der kapazitiven Last (2) im Gleitbetrieb die geforderten Ströme zur Verfügung stehen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Stabilisierungsalgorithmus (8) Verzögerungsfunktionen, mit z. B. PT-1 Verhalten, realisiert.
3. Schaltungsanordnung zur Strom- und Ladungsregelung von kapazitiven Lasten wie z. B. Piezoaktoren, insbesondere im kHz-Bereich, bestehend aus einer Induktivität zum Konstanthalten des Stromes und einem Transistorpulssteller, der die kapazitive Last ansteuert, **dadurch gekennzeichnet**, daß
  - eine Stabilisierungseinrichtung (4) zum Verzögern ihrer Eingangsgrößen vorgesehen ist, wobei die Eingangsgrößen der Stabilisierungseinrichtung (4) Momentanwerte von Strom und Ladung der kapazitiven Last (2) bzw. nur vom Strom sind und die Parameter der Stabilisierungseinrichtung (4) die Bedingungen zur Entstehung des Gleitbetriebes erfüllen,
  - der Ausgang der Stabilisierungseinrichtung (4) auf einen Komparator (5) geschaltet ist, der die Ausgangsgröße der Stabilisierungseinrichtung (4) mit einem Referenzsignal der Ladung vergleicht,
  - der Ausgang des Komparators (5) auf einen Impulsverteiler (11) geschaltet ist, der den Transistorpulsstellers (3) im Gleitbetrieb ansteuert.
4. Schaltungsanordnung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Induktivität (21) der Stromquelle so dimensioniert ist, daß für das Auf- und Entladen der kapazitiven Last (2) im Gleitbetrieb die geforderten Ströme zur Verfügung stehen.
5. Schaltungsanordnung nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Stabilisierungseinrichtung (4) Baugruppen, wie z. B. PT-1 Glieder, zum Verzögern ihrer Eingangsgrößen enthält.
6. Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 1 oder 2 oder der Schaltungsanordnung nach einem der Ansprüche 3 bis 5 zur hochdynamischen und hochpräzisen Positionierung von Piezoaktoren und/oder zur aktiven Schwingungsdämpfung an Maschinen und Geräten

- Leerseite -

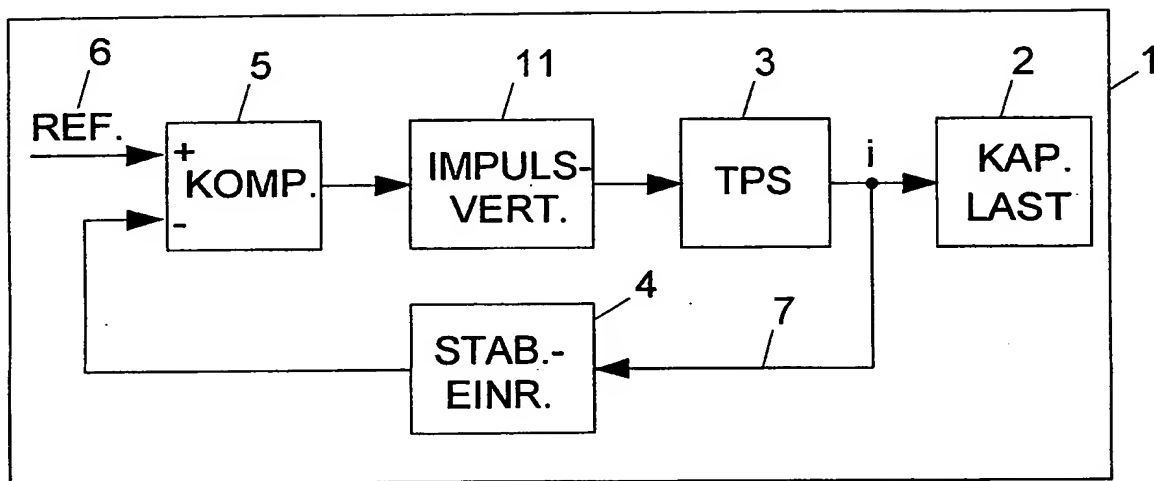


Fig. 1

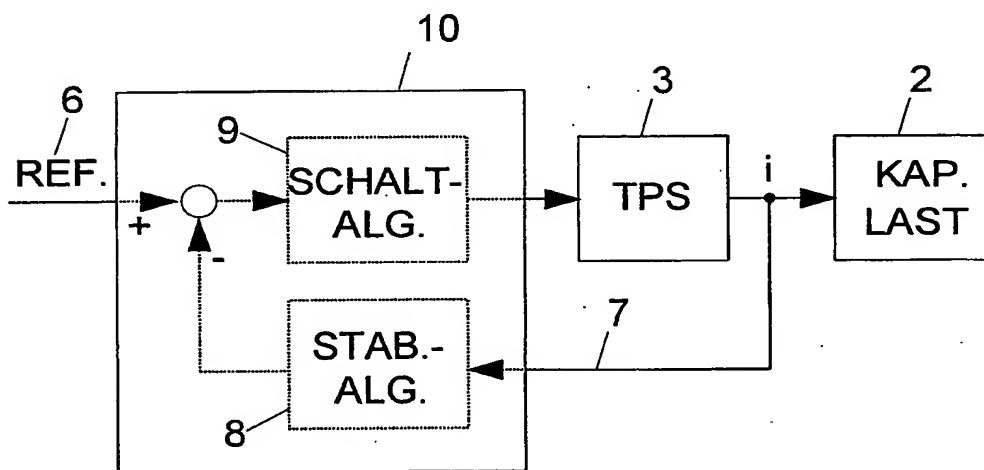


Fig. 2

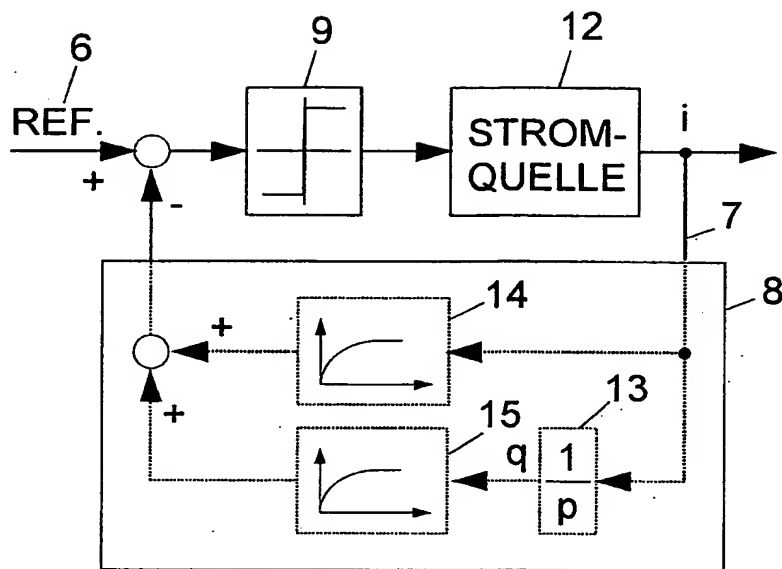


Fig. 3

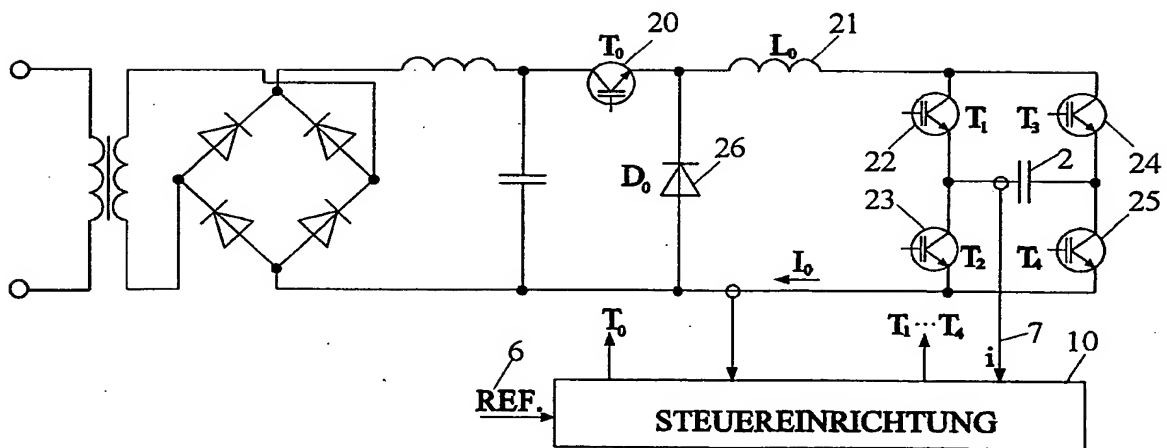


Fig. 4

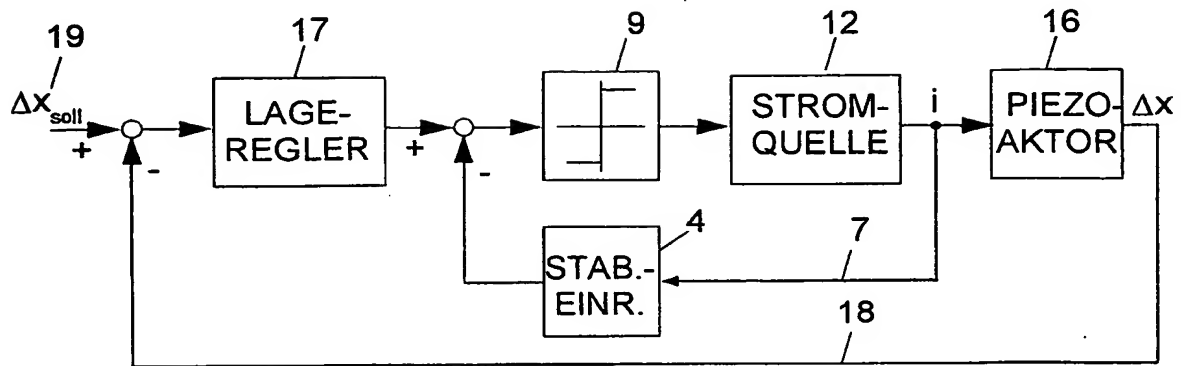


Fig. 5